

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公表特許公報 (A)

(11) 特許出願公表番号

特表2002-506217

(P2002-506217A)

(43) 公表日 平成14年2月26日 (2002. 2. 26)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テマコード* (参考)
G 0 1 B 11/30	1 0 2	G 0 1 B 11/30	1 0 2 Z 2 F 0 6 5
G 0 1 N 13/16		G 0 1 N 13/16	A 2 F 0 6 9
// G 0 1 B 21/30	1 0 2	G 0 1 B 21/30	1 0 2

審査請求 未請求 予備審査請求 有 (全 30 頁)

(21) 出願番号 特願2000-535894(P2000-535894)
 (86) (22) 出願日 平成11年3月10日 (1999. 3. 10)
 (85) 翻訳文提出日 平成12年9月8日 (2000. 9. 8)
 (86) 国際出願番号 PCT/US99/05189
 (87) 国際公開番号 WO99/46558
 (87) 国際公開日 平成11年9月16日 (1999. 9. 16)
 (31) 優先権主張番号 09/037, 806
 (32) 優先日 平成10年3月10日 (1998. 3. 10)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)
 (81) 指定国 EP(AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, I T, LU, MC, NL, PT, SE), JP, KR

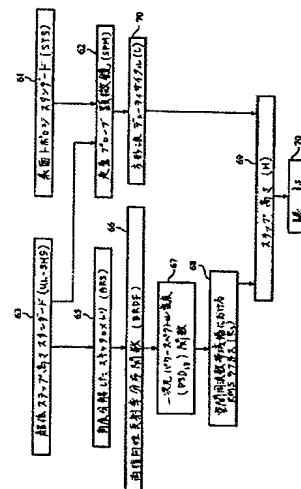
(71) 出願人 フィ・エル・エス・アイ・スタンダーズ・インコーポレイテッド
 VLSI STANDARDS, INCORPORATED
 アメリカ合衆国、95134-2006 カリフォルニア州、サン・ノゼ、ノース・ファースト・ストリート、3087
 (72) 発明者 シェイア、ブラッドリー・ダブリュ
 アメリカ合衆国、95129 カリフォルニア州、サン・ノゼ、テレシータ・ドライブ、1495
 (74) 代理人 弁理士 深見 久郎 (外5名)

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 原子レベルのステップ高さスタンダード認証方法

(57) 【要約】

走査プローブ顕微鏡法 (62) を UL-SHS、すなわち超低ステップ高さスタンダード (63) および表面トポグラフィスタンダード (61) に対して用いてステップ (70) において用いるための方形波デューティサイクル (C) を定める。角度分解したスキャタロメトリ (65) を UL-SHS (63) に対して用いて両指向性反射率分布 (66) を定め、その後、一次元のパワー密度関数 (67) を定め、その後、空間周波数帯域幅における RMS ラフネス (68) を定める。これおよび方形波デューティサイクル (C) から、ステップ高さ (69) が定められ、認証 (70) が完了する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 ステップ高さ校正スタンダードを認証する方法であって、

前記スタンダードは概して平滑な反射表面を有するが前記表面上に規則的な特徴が形成される物理的人工品であり、前記規則的な表面特徴は一次元の方形波断面を有する交互の平行する平坦な線形メサおよび谷の周期的パターンであり、交互のメサおよび谷の前記パターンは $100\mu\text{m}$ より小さい周期性またはピッチと、約50%であることがわかっているデューティサイクルと、最大 100\AA の特性ステップ高さとを有しており、前記認証する方法は、

角度分解したスキャトロメータを用いて表面特徴の前記周期的パターンから散乱した光に対して両指向性反射率分布関数(BRDF)を測定するステップと、前記BRDF測定からrmsラフネス(R_q)値を計算するステップと、

前記計算された R_q 値および仮定された50%のデューティサイクルから前記スタンダード上の特徴の前記パターンの前記特性ステップ高さ(H)を定めるステップとを含み、前記スタンダードは前記定められた特性ステップ高さ(H)を有する前記規則的な表面特徴を有するものとして認証され、前記認証されたスタンダードによる後に校正するステップ高さ測定機器において用いられる、方法。

【請求項2】 校正されたプローブ顕微鏡を用いて表面特徴の前記周期的パターンの前記ピッチ(P)と、前記メサの線幅(L)および前記谷の空間幅(S)のうちの少なくとも一方とを測定するステップと、 $C=L/P=1-(S/P)$ である、前記測定からの前記パターンのデューティサイクル(C)を確認するステップとをさらに含み、前記スタンダードはさらに、前記確認されたデューティサイクル(C)を有する表面特徴の前記パターンを有するものとして認証され、前記特性ステップ高さ(H)を定めることは $H=R_q[C(1-C)]^{-1/2}$ の等式に従ってなされる、請求項1に記載の認証する方法。

【請求項3】 前記プローブ顕微鏡は、発行されているNIST SRM-476にトレースできる表面トポグラフィスタンダードで校正される原子間力顕微鏡である、請求項2に記載の認証する方法。

【請求項4】 前記ピッチ(P)は約 $20\mu\text{m}$ である、請求項2に記載の認証する方法。

【請求項5】 前記デューティサイクル（C）は約50%である、請求項2に記載の認証する方法。

【請求項6】 前記 R_q 値は、前記BRDF測定から計算される一次元パワースペクトル密度（PSD）関数から導出される、請求項1に記載の認証する方法。

【請求項7】 前記 R_q 値は、少なくとも
【数1】

$$f_{\min} \approx 1/(2P) \text{ から } f_{\max} \geq 25 f_{\min} \text{ までの}$$

空間周波数帯域幅にわたって得られる、請求項1に記載の認証する方法。

【請求項8】 前記スキャタロメータは、約3mmの直径を有する入射レーザビームを前記周期的パターン上に向ける、請求項1に記載の認証する方法。

【請求項9】 前記スタンダードを構成する前記物理的人工品はシリコンウエハダイである、請求項1に記載の認証する方法。

【請求項10】 前記ダイはより大きい基板上に載置される、請求項9に記載の認証する方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【技術分野】

この発明は、概して平滑な表面上の地形特徴の表面プロファイルを測定することに関し、特に、さまざまな機械的または光学のプロファイリング機器のいずれかを用いてそのような表面上のステップ特徴の高さを測定することに関する。この発明は特に、ステップ高さ較正スタンダードを用いたステップ高さ測定機器の較正およびそのようなスタンダードの認証に関する。

【0002】

【背景技術】

ステップ高さスタンダードは表面プロファイリング機器を較正する上で有用である。このようなスタンダードの1つが「表面プロファイラ較正のためのステップ高さスタンダード」(“A Step-Height Standard For Surface Profiler Calibration,” SPIE Vol. 1995 Optical Scattering (1993) pp. 235-244) と題された論文においてピーター・Z・タカックス (Peter Z. Takacs) およびユージン・L・チャーチ (Eugene L. Church) により開示される。そのスタンダードは、その中に異方性エッチングされた単一の中央ステップを備えた平坦な領域を含み、また、 $50\mu\text{m}$ および $10\mu\text{m}$ のピッチの2つの薄層をなすプロファイルバーパターンを含む。この単一のステップは光学プロファイラを較正するのに有効であり、バーパターンはスタイラスプロファイラを較正するのに有効である。そのバーパターンにより、スタイラスプローブがその横方向の位置にかかわらず第1回目の試みにおいてエッジを見出すことを確実にする。ステップの頂点から谷までの高さは約 150nm である。

【0003】

最近では、より規模が小さい縦方向特徴を作るための技術が開発されている。較正スタンダードを作る上で用いられるそのような方法の1つは、この発明の譲受人に譲渡される、レアード (Laird) 他への米国特許第5, 599, 464号に記載される。その方法により、 10\AA (1nm) のオーダの縦方向高さを有する特徴を一貫して作ることができる。その特許ではさらに、幾百万ものそのよう

な特徴をウェハ上に同時に作って研磨されたウェハ上にヘイズまたはマイクロラフネスの効果をシミュレートでき、これによってマイクロラフネススタンダードとして有効に用いられることが開示される。

【0004】

「工業用の平滑表面のマイクロラフネススタンダードに対する要件および提案」(“Requirements and suggestions for industrial smooth surface micro roughness standards,” SPIE vol.2862 Proceedings, 1996年8月8日-9日、コロラド州デンバー、pp.69-77)と題された論文においてジョン・C・ストーバー (John C. Stover) は、矩形の断面と50%のデューティサイクルを有するグレーティングを有するマイクロラフネススタンダードを提案している。このスタンダードによれば、結果生じるパワースペクトル密度 (PSD) は、無限の一連の調和的に関連づけられたピークからなり (デューティサイクルが50%である際には偶数オーダーが欠けている)、その振幅はグレーティングステップの高さに関連しており、 f^{-2} に従って下降し、ここで f はグレーティングのピッチに関連のある空間周波数である。さらに、RMSマイクロラフネス値は、この一連のピーク (ほぼ第21次のオーダーまで) の和の平方根をとることによって見出される。

【0005】

ステップ高さスタンダードの場合には、ステップ高さが約50 Åより低くなるとスタンダードを認証するためにステップ高さを確認するのが困難であることがわかっている。たとえば、原子間力顕微鏡を用いて直接エピタキシャルシリコンのステップ高さを測定する場合、得られるステップ高さ値はウェハの正確な結晶方位に依存しており、簡単に20%ほど外れ得る。

【0006】

この発明の目的は、証明されたトレーサビリティによりステップ高さ較正スタンダードを証明する方法と、第1の方法によって認証された較正スタンダードによってステップ高さ測定機器を較正する方法とを提供することである。

【0007】

【発明の開示】

この目的は、矩形のグレーティングタイプのマイクロラフネススタンダードを

利用し、これを代わりにステップ高さスタンダードとして用いる方法によって達成される。スタンダードは、ほぼ平滑な反射表面を有するがその表面に規則的な特徴が形成される物理的人工品である。これらの規則的な特徴は、一次元（1D）の方形波（矩形）の断面を有する交互の平行する平坦な線形メサおよび谷（valley）の周期的なパターンである。特性ステップ高さ（メサから谷）は最大100 Åであり、パターンの周期性またはピッチ（P）は100 μmより小さく、好ましくは約20 μmである。

【0008】

認証方法は、原子間力顕微鏡など、較正されたプローブ顕微鏡を用いて、表面特徴の周期的パターンのピッチと、メサ特徴の線幅（L）および谷の空間幅（S）の少なくとも一方とを測定することを含む。この測定から、パターンのデューティサイクル（C）が得られ、ここで $C = L / P = 1 - (S / P)$ である。好ましくは、認証されるスタンダードは約50%のデューティサイクルを有する。認証方法はさらに、角度分解したスキャトロメータを用いてスタンダード上の表面特徴の周期的パターンから散乱する光に対して両指向性反射率分布関数（BRDF）を測定することを含む。この測定および得られたデューティサイクルから、一連の計算によって最終的に特性ステップ高さ（H）が定められる。これらの計算には、測定されたBRDF値から1Dパワースペクトル分布（PSD）関数を得ることと、次に、そのPSD関数からRMSラフネス（ R_q ）値を得ることと、最後に、 $H = R_q [C(1 - C)]^{-1/2}$ の等式に従って R_q 値から特性ステップ高さ（H）を定めることが含まれる。認証されたステップ高さ値の精度が十分なものであるように、測定および計算は少なくとも

【0009】

【数2】

$$f_{\min} \approx 1/(2P) \text{ から } f_{\max} \geq 25 f_{\min} \text{ までの}$$

【0010】

空間周波数帯域幅にわたって行なわれるべきである。

一旦ステップ高さ較正スタンダードが認証されると、これを用いて数多くのタ

イブのステップ高さ測定機器を校正することができる。こうして既知のピッチ、デューティサイクルおよび特性ステップ高さを有することとなったスタンダードを測定機器内に置く。スタンダードのステップ高さをその機器によって測定し、その機器に特有の手法に従って校正し、次に測定された結果を既知の認証値と比較する。すべての校正手法においてそうであるように、この比較を用いて機器の調整を行ない、測定されたステップ高さ値を認証された値に合わせる。校正を完了するには複数の連続する測定とその間に行なわれる調整とが必要であるかもしれない。

【0011】

この発明の認証方法により、以前の手法と比べてかなり小さいステップ高さのスタンダードを認証することが可能となる。特に、この発明は、以前のマイクロラフネススタンダードが光学散乱を介する測定されたマイクロラフネスをスタンダード上の特徴のステップ高さに正確に関連付けるという特性を有していることを認識した結果である。したがって、この特定のタイプのマイクロラフネススタンダードはステップ高さスタンダードとしても有効であることがわかった。

【0012】

【発明を実施するための最良の形態】

図1を参照して、校正スタンダードは、シリコンウェハダイ10の形態である物理的人工物であり、ダイの上面14に形成される規則的な表面特徴12のパターンを有する。このダイは約 $525\mu\text{m}$ の厚さであってもよく、 $7\text{mm}\times 14\text{mm}$ の寸法の主表面を有する。表面特徴12のパターンは上面14の $7\text{mm}\times 7\text{mm}$ の区域を占め得る。しかしながら、これらの寸法は重要ではなく、全く例示的なものとみなすべきである。ダイはたとえばプロファイロメータのステージ上で用いるための $50\text{mm}\times 50\text{mm}\times 6\text{mm}$ 厚の石英基板などのより大きい基板上に載置してもよく、または検査区域の限られた、原子間力顕微鏡（AFM）もしくは他の走査プローブ顕微鏡（SPM）で用いるために取外すことができる。このため、ダイの形状は校正すべき機器の基板取扱い能力に基づいて選択できる。

【0013】

図2の拡大図を参照して、ダイの上面14上の規則的な表面特徴12が、一次

元の方形波、すなわち矩形、の断面を有する、交互の平行する平坦な線形メサ16および谷18の周期的なパターンであるのが分かる。上面14そのものは、交互のメサ16および谷18によって作られたステップを除いては概して平滑な反射表面である。すなわち、メサ16の頂部は概して平面状であり、平滑で、かつ鏡面反射し、同様に谷18の表面も概して平面状であり、平滑で、かつ鏡面反射し、ヘイズが最小である。本来ベアのシリコン基板10の上に全体的に天然の酸化物の薄膜19が形成される。

【0014】

酸化膜19は取除いてはならない。なぜなら、再び新しい膜が自然に形成されるためであり、また、表面は、較正スタンダードが認証されたステップ高さ値を維持するためには安定していなければならない。スタンダードの表面のマイクロレベルのテクスチャを変化させるどのような洗浄プロセスも、圧縮ガスで吹付けることさえも、ステップ高さ値を変化させることとなり、スタンダードの再認証が必要となる。同様に、スタンダードを酸化膜19が成長するような高温にさらしてはならず、また、スタンダードが濡れるようなことがあってはならない。粒子が表面を汚染してスタンダードの精度を減少させることを防ぐため、スタンダードをクラス10環境またはそれ以上の環境で容器内に保管し、較正測定を行なう準備ができた際だけその容器から取出し、その後すぐに容器に戻す必要がある。スタンダードを取扱う上では注意を払う必要がある。

【0015】

次に図3を参照して、特徴の規則的なパターンの断面図により、定量化できるいくつかのパラメータが示される。パターンは周期的なものであるため、メサおよび谷の対にわたっての幅寸法である周期性またはピッチPを有する。このピッチ寸法Pは、メサにわたっての幅寸法である線幅Lと、谷にわたっての幅寸法である空間幅Sとの寄与によってできている。すなわち、 $P = L + S$ である。また、デューティサイクル(C)をこれらの測定した数量のうちのいずれか2つから規定することもできる。 $C = L/P = 1 - (S/P) = L/(L + S)$ 。最終の測定可能な数量はステップ高さHであり、これはメサの頂部から谷の底面までの深さ寸法である。以下に図7および図8に関連してさらに説明するように、ステ

ップ高さはいずれの実際の較正スタンダードにおいても本質的に平均値である。

【0016】

次に図4A-図4Fおよび図5A-図5Fを参照して、較正スタンダードを形成するウェハダイ上の表面特徴を作るための2つのプロセスが示される。そのプロセスは米国特許第5,599,464号に記載される。図は単一の特徴の製造を示しているが、実際にはウェハ上のすべての特徴が同時に作られることになる。

【0017】

図4Aには、シリコン基板上に熱成長させた二酸化シリコンの均一層21を有するシリコンウェハ20が示される。二酸化シリコン層は500Åと1000Åとの間の厚さを有する。Silicon Processing for the VLSI Era (vol.1, p.200-212)と題された本にはシリコンの熱酸化について説明されている。この本は、ディール (Deal) およびグロブ (Grove) がシリコン酸化を次のように説明していることに言及している。すなわち、シリコン酸化とは、分子酸素などのオキシダントが既存の酸化物を通してシリコン-二酸化シリコン界面まで拡散し、そこで分子がシリコンと反応して二酸化シリコンを形成する進行であると説明している。換言すると、酸素はペアのシリコン基板に移動し、そこでシリコンと相互作用し、これによって酸化が生じた場所でシリコン/二酸化シリコン界面のレベルを低下させる。これがこの発明の重要な局面である。

【0018】

図4Bでは、ポジ型フォトリソの薄い層23が塗布される。フォトリソはマスクによって特徴の所望の位置、面積的広がりおよび全体密度をもってパターンニングされてもよい。光を用いてマスクを介してフォトリソ層23を露光する場合、光によってフォトリソに特徴の潜像が形成される。換言すると、露光されたフォトリソにおいて化学結合が壊れ、リソの分子量および可溶性を変化させ、このことにより潜像を現像することが可能となり、エッチングされた区域において露光されたフォトリソを除去し、下にある二酸化シリコン層をあらわにする。ポジ型フォトリソの場合、露光されたフォトリソの結合が壊される。

【0019】

図4Cにおいて、除去されたレジスト層23の部分はレジストが光によって露光されたところに開口25を生じる。酸化物エッチャントを用いて二酸化シリコンをシリコン基板20の上部面27まで除去する。これは元のレベルより均一に低い。

【0020】

図4Dでは、フォトリソが酸化層21から剥がされる。この発明の光散乱特徴を含む、地形特徴を形成することとなる類似のトレンチのアレイにおける、単一のトレンチ31となった開口領域25は、空気にさらされることによって自己制限的に再酸化される。どのような酸化させる周囲環境を用いることもできるが、空気は効果的であり、かつ安価である。室温での空気酸化により、約17 Åの厚さを有する天然の酸化物が生成される。天然酸化層の約半分が基板界面におけるシリコンを消費する。これは図4Eに示されており、ピットの底部における天然の酸化物がシリコン基板の中の、二酸化シリコンを支持する前のレベル27より下まで延在する。天然酸化層の形成は急速であるが、概して短時間の後にひとりでに止まる。

【0021】

次に、図4Fに示されるように酸化物がすべて剥がされる。ここでトレンチ33の底部と二酸化シリコンを支持していた前のベース27との間には差分ステップ高さが存在することが明らかとなる。

【0022】

図4A-図4Fでは、暗視野マスク (dark field mask) を用いて光反射フィールド27内のピット33を結果として生じる地形特徴の構造を示した。逆のプロセスを用いて、トレンチではなくステップ高さを有するメサ特徴を生成することもできる。逆のプロセスは逆マスクによって、または反対のタイプのフォトリソを用いて実行できる。この逆プロセスを図5A-図5Fに示す。

【0023】

図5Aでは、均一の熱酸化物層41が研磨された光反射性シリコンウェハの上に700 Åと1000 Åとの間の厚さに成長させられる。このような層は半導体

産業では容易にウェハの表面にわたって良好な整合性 (consistency) および均一の厚さをもって製造できる。より薄い厚さで作ることもできるが、製造を容易にするためと測定機器で厚さを確認するため、700 Åから1000 Åの範囲が好ましい。

【0024】

図5Bでは、フォトレジストの層43が熱酸化層41の上に配置される。フォトレジストは、図4Bおよび図4Cに関連して前に説明した露光に用いられたマスクに対する光学的相補性のマスクを介して光で露光される。

【0025】

フォトレジストの露光された部分を除去し酸化物をエッチングした後に、図5Cに示されるようなメサが残される。メサ45は、フォトレジストの小さい層43とその上の同様な大きさにされた熱酸化物41の層とからなる。図5Dには、そのフォトレジストの部分が剥がされているのが示される。

【0026】

図5Eでは、空気がウェハと接触するようにされ、初期のウェハレベルより下のシリコンが消費されるにつれ、露出したシリコン上に天然の酸化物の非常に薄い層51が成長している。二酸化シリコンのアイランド41が取除かれ、小さいメサまたは特徴53が残り、これも空気にさらされ、均一な薄い天然の酸化層を有する。特徴53は周囲のシリコンフィールドの表面から上方へ約8 Åから9 Åだけ延在する。

【0027】

図6を参照して、スタンダードの認証は主に、物理的第1原則分析 (physical first principles analysis) にトレースできる (traceable) rms マイクロラフネス (R_q) の測定に基づく。パターン特徴の一次元方形波 (矩形) 断面および50%のデューティサイクルに対し、ステップ高さHは $2R_q$ に等しい。この関係はデューティサイクルが正確に50%ではない際にはわずかに変更しなければならないが、本質的にこの特定のスタンダードの特性ステップ高さは角度分解したスキヤトロメトリ測定値から得ることが可能である。正確さのため、スキヤトロメトリ測定は、パターンのデューティサイクルを得るためのピッチ幅およ

び線幅の原子間力顕微鏡（または他の走査プローブ顕微鏡）測定によって補われる。超低ステップ特徴（ $H \leq 50 \text{ \AA}$ ）の直接のステップ高さ測定を認証するという目的には原子間力顕微鏡は不適当であることがわかっているが、原子間力顕微鏡は、典型的に約 $5 \mu\text{m}$ から $50 \mu\text{m}$ 幅のオーダであるピッチ、線幅および空間幅を正確に測定することが可能である。

【0028】

デューティサイクル判定から始め、原子間力顕微鏡などの走査プローブ顕微鏡（SPM）を、まず、表面トポグラフィスタンダード（STS）61によって正確な幅測定のために校正する。そのスタンダードはNIST SRM-476にトレースできる。一旦SPMが校正されると、これを用いて、認証すべき超低ステップ高さスタンダード（UL-SHS）63上の特徴のピッチ（P）、線幅および空間幅（LおよびS）を測定する（ステップ62）。これらの測定値のうちのいずれか2つから $C = L/P = 1 - (S/P)$ の定義に従ってデューティサイクル（C）が導出される（ステップ64）。ここで、 $P = L + S$ はピッチであり、LおよびSはそれぞれ、メサ特徴の線幅および谷の空間幅である。

【0029】

次に、光学スキャタロメトリによってマイクロラフネス値（ R_q ）を測定する。特に、角度分解したスキャタロメトリ（ステップ65）を用いて、表面特徴の周期的パターンから散乱する光に対して両指向性反射率分布関数（BRSF）66を得る。特定的には、周期的パターンは、ある特定の優先的方向に光を散乱させるある種のグレーティングとして作用し、さまざまな散乱方向の強度はステップ高さHを含むパターン寸法に依存する。スタンダード上の直径3mmのスポットサイズおよび633nmの波長を有する照明レーザビームがスキャタロメータでは典型的である。測定されたBRDFから、一次元のパワースペクトル密度（ PSD_{1D} ）関数が計算され（ステップ67）、その PSD_{1D} 関数からrmsラフネス（ R_q ）値が導出される（ステップ68）。測定および計算は好ましくは、光散乱の少なくとも第11次のオーダの奇数調波までとらえるために、少なくとも最小空間周波数

【0030】

【数3】

$$f_{\min} \approx 1/(2P)$$

【0031】

から最大空間周波数

【0032】

【数4】

$$f_{\max} \geq 25 f_{\min}$$

【0033】

の空間帯域幅に対して行なわれる。好ましくは、

【0034】

【数5】

$$f_{\max} \approx 1.2 \mu\text{m}^{-1}$$

【0035】

であり、これは約 $20 \mu\text{m}$ の典型的なピッチ P に対して、 f_{\max} に対する $25 f_{\min}$ の下限を十分に超えるものである。最小空間周波数 f_{\min} は単純に、空間周波数 $f_1 = 1/P$ における光散乱の基本的なオーダーをとらえることを確実にするために選択される。 R_q 測定のトレーサビリティは、ANSI/NCSL ZS40 および ISO 10012 に挙げられる固有スタンダードにトレースできる。

【0036】

表面特徴の上述の周期的パターンを有するスタンダードに対する光学スキャタロメトリ測定値による rms マイクロラフネス R_q の計算は、この発明の譲受人に譲渡される、1997年8月7日出願の同時係属中の米国特許出願第08/908,524号に記載される。簡潔には、スキャタロメトリ機器はTMA CASI (r) 角度分解した光散乱 (ARS: angle-resolved light scattering) 機器であつてもよい。これは光の波長および機器の光学的ジオメトリに基づいて第1原則トレーサビリティを可能にする専門の道具である。角度分解したスキャ

タロメトリを介して測定した実際の数量は両指向性反射率分布関数（BRDF）であり、以下の通りである。

【0037】

【数6】

$$(1) \quad \text{BRDF} = \frac{P_s / \Omega_s}{P_i \cdot \cos \theta_s}$$

【0038】

ここで、 P_s は、角度 θ_s の関数として立体角 Ω_s にわたって集められた散乱光のパワーである。係数 P_i は、ウェハ法線から角度 θ_i における入射レーザパワーを示す。このように、BRDFは物理的には、所与の立体角内に散乱させられた再配分されたエネルギー以上の何ものでもない。

【0039】

積分スキャタロメータなどのレーザベースの機器の場合、帯域は以下のように規定される。入射角 θ_i における入射単色レーザビーム、（角度 θ_s における）正反射ビームおよび散乱ビームがすべて同じ面上にある場合、空間周波数は以下の一次元グレーティング等式による散乱角に関連する。

【0040】

【数7】

$$(2) \quad f = \frac{\sin \theta_s \cdot \cos \phi_s - \sin \theta_i}{\lambda}$$

【0041】

ここで f は空間周波数であり、 λ はレーザ照明波長である。 ϕ_s の項は、それぞれ $\phi_s = 0^\circ$ および 180° に対し、1.0 および -1.0 の値をとる。

【0042】

理想的には、機器の伝達関数は帯域領域では平坦でありそれ以外では0である。これは実際には決して達成されず、真の機器間比較を行なうためには、空間帯域は常に伝達関数（入手可能であれば）とたたみ込まれなければならない。

【0043】

一次元パワースペクトル密度 (PSD) 関数は、空間周波数 f の単位当りの散乱したパワーの測定単位である。PSD関数は測定されたBRDFから計算される。

【0044】

【数8】

$$(3) \quad \text{PSD}(f_x, f_y) = \frac{10^8 \lambda^4 \text{BRDF}}{16\pi^2 \cdot \cos \theta_s \cdot Q}$$

【0045】

ここで、 s 偏光に対し、係数 Q はウェハ表面の正反射率により近似される。この反射率は、波長、入射角および偏光の関数である。その表面が等方性である場合、 $\text{PSD}(f_x, f_y)$ は方位角 ϕ_s のあたりで積分され等方性PSD関数

【0046】

【数9】

$$(4) \quad \text{PSD}_{\text{iso}}(f) = \int_0^{2\pi} \text{PSD}(f_x, f_y) f \, d\phi_s = 2\pi f \cdot \text{PSD}(f_x, f_y)$$

【0047】

を得ることができ、 $\text{\AA}^2 \mu\text{m}$ の単位であり、 f は f_x および f_y の二乗和の平方根に等しい。等式4における $\text{PSD}_{\text{iso}}(f)$ というこの関数こそが、一次元PSD関数に加えられ、rms ラフネスが計算される関数となる。方形波は一次元の散乱体であるが、シリコンの「ピークおよびトラフ」の粗さ (roughness) は等方性の散乱体である。したがって、2つの測定が行なわれ、その1つは方形波表面の方向が (一次元PSD曲線生成全体に対し) レーザの入射面に垂直であり、もう1つは表面が平行である。第2の走査により、エッチングされた特徴とは無関係にシリコンの粗さを測定する。この値は次に、等式4で等方性の値に変換され、次に二乗和の平方根として一次元走査に加算される (等式7)。シリコンの粗さは実際には、低い公称ラフネス値においてのみ意味を持つものであるが、慣

例として一貫して測定される。

【0048】

PSD関数は、典型的には逆マイクロメータなど、空間周波数の単位で測定された表面粗さの周波数スペクトルである。PSD関数は、表面の振幅および空間波長（1/f）の双方についての情報をもたらす。rmsラフネスは、一次元PSD曲線の積分の平方根として直接計算してもよい。rmsマイクロラフネススタンダードの場合では、シリコンの固有の粗さを考慮するために等方性ラフネス値をも加える必要がある。一次元パワースペクトル密度関数 PSD_{1D} からの、空間周波数 f_{min} と空間周波数 f_{max} との間のrmsラフネス R_q は以下のとおりである。

【0049】

【数10】

$$(5) \quad R_q = \sqrt{2 \cdot \int_{f_{min}}^{f_{max}} PSD_{1D}(f) df}$$

【0050】

角度分解したスキャタロメトリからのデータのすべてが離散点に入れられるため、これらのデータをrmsラフネス値に変換するのに必要である「積分」は単に、乗算された一次元PSD関数 $PSD_{1D}(f)$ の総和の平方根に、積分の適当な範囲内で差分（differential）周波数ステップサイズを掛けたものとなる。

【0051】

【数11】

$$(6) \quad R_q = \left(2 \int_{f_l}^{f_h} PSD_{1D}(f) df \right)^{1/2} \Rightarrow R_q = \sqrt{2 \cdot \sum_{i=f_l}^{f_h} PSD_{1D} \delta f}$$

【0052】

また、この等式が、試験下の機器の空間帯域幅範囲に従って設定される f_l および f_h で示される積分の限界を意味することに注意されたい。シリコンの固有の

等方性ラフネスを考慮するため、等式6にさらなる項 PSD_{iso} を加える必要もある。RQSスタンダードのための最終の式は等式7の形をとる。

【0053】

【数12】

$$(7) \quad R_q = \left(2 \int_{f_l}^{f_h} PSD_{ID}(f) df + \int_{f_l}^{f_h} PSD_{iso}(f) df \right)^{1/2}$$

【0054】

これは、所与の範囲の積分限界に対するスタンダードのための rms ラフネス値を認証するのに用いられる等式である。

【0055】

一旦、一次元パワースペクトル密度関数 (PSD_{ID}) からのマイクロラフネス値 R_q およびデューティサイクル C の双方がわかると (等式6)、スタンダード上の特徴の特性ステップ高さ H は、 $H = R_q [C(1-C)]^{-1/2}$ の等式に従って定められる (ステップ69)。このスタンダードはその後校正するステップ高さ測定機器において用いるために、定められたステップ高さ H およびデューティサイクル C を有するものとして認証される (ステップ70)。

【0056】

校正は、認証されたステップ高さスタンダードを、原子間力顕微鏡または他の走査プローブ顕微鏡、干渉計または他の光学プロファイロメータなどの機器に対してステップ高さを測定する関係に配置することを含む。直接に測定するか、または間接の測定値からの一連の計算を介して、その機器でステップ高さを測定した後、結果生じる測定された値をステップ高さ H の既知の認証された値と比較する。既知の認証された値に校正すべき機器から得られた測定された値のいかなる偏差も、測定された値と認証された値とが認証された不確定性において等しくなるまで機器を調整するのに用いられる。

【0057】

図7および図8を参照して、特性ステップ高さ H の規定は、スタンダード自体

の固有の表面テクスチャにより必然的に有効または平均ステップ高さである。エッチングされたシリコン基板の表面は（図2に示されるように）天然酸化物の薄膜を有する。この酸化膜は公称分子「直径」が約3.55 Åであるアモルファスシリカ（SiO₂）である。最良のスタンダードであってもマイクロテクスチャのメサ表面および谷表面72および74を生じるこのアモルファスシリカ膜を有することになる。図7に示される点はアモルファスシリカの「分子」を表わす。特徴によりもたらされる表面テクスチャのレベルが非常に低いため（典型的なステップ高さHは約10 Åであり、これは公称シリカ「直径」の2.8倍でしかない）、いかなるステップ高さ測定も必然的にその性質上統計的なものである。図8は、メサ特徴および谷特徴のさまざまな部分の高さまたは深さZを示す。ある特定の深さ測定の場合の数Nが深さZに対してプロットされ、メサおよび谷の双方に対して平均値

【0058】

【数13】

\bar{Z}

【0059】

について（ベル型の）ガウス分布を示す。第1の曲線76は谷のさまざまな部分に対する深さ測定を表わし、平均値

【0060】

【数14】

\bar{Z}_{bottom}

【0061】

を有する。第2の曲線78は、メサ特徴の上面のさまざまな部分に対する対応する深さ測定を表わし、平均値

【0062】

【数15】

$$\overline{Z}_{\text{top}}$$

【0063】

を有する。ステップ高さHは平均値

【0064】

【数16】

$$\overline{H}$$

【0065】

であり、これは

【0066】

【数17】

$$\overline{H} = \overline{z(x, y)}_{\text{top}} - \overline{z(x, y)}_{\text{bottom}}$$

【0067】

であり、ここで測定値は表面位置 (x, y) にわたって平均される。特徴深さの統計的な性質は、すべてのメサ72が同一の平均深さ

【0068】

【数18】

$$\overline{Z}_{\text{top}}$$

【0069】

を有し、すべての谷74が同様に同一の平均深さ

【0070】

【数19】

$$\overline{Z}_{\text{bottom}}$$

【0071】

を有する際であっても生じることに注目されたい。異なる特徴間の高さの変動もまたあり得ることであり、約300個の異なるメサ特徴および谷特徴の部分を取囲む3mm直径の照明レーザスポットを用いたスキヤトロメトリ測定によって平均される。

【図面の簡単な説明】

【図1】 この発明においてステップ高さスタンダードとして用いられる人工品の斜視図である。

【図2】 図1において円2で示される区域内のスタンダードの部分の拡大斜視図である。

【図3】 この発明の認証方法によって測定されたさまざまなパラメータ、ピッチ(P)、線幅(L)、空間幅(S)およびステップ高さ(H)を示す、図1のスタンダードの断面を示す概略側面図である。

【図4A】 2つの製造プロセスの対応する1つに従った製造の各段階におけるウェハステップ高さスタンダードの側面図である。

【図4B】 2つの製造プロセスの対応する1つに従った製造の各段階におけるウェハステップ高さスタンダードの側面図である。

【図4C】 2つの製造プロセスの対応する1つに従った製造の各段階におけるウェハステップ高さスタンダードの側面図である。

【図4D】 2つの製造プロセスの対応する1つに従った製造の各段階におけるウェハステップ高さスタンダードの側面図である。

【図4E】 2つの製造プロセスの対応する1つに従った製造の各段階におけるウェハステップ高さスタンダードの側面図である。

【図4F】 2つの製造プロセスの対応する1つに従った製造の各段階におけるウェハステップ高さスタンダードの側面図である。

【図5A】 2つの製造プロセスの対応する1つに従った製造の各段階におけるウェハステップ高さスタンダードの側面図である。

【図5B】 2つの製造プロセスの対応する1つに従った製造の各段階におけるウェハステップ高さスタンダードの側面図である。

【図5C】 2つの製造プロセスの対応する1つに従った製造の各段階にお

けるウェハステップ高さスタンダードの側面図である。

【図5D】 2つの製造プロセスの対応する1つに従った製造の各段階におけるウェハステップ高さスタンダードの側面図である。

【図5E】 2つの製造プロセスの対応する1つに従った製造の各段階におけるウェハステップ高さスタンダードの側面図である。

【図5F】 2つの製造プロセスの対応する1つに従った製造の各段階におけるウェハステップ高さスタンダードの側面図である。

【図6】 図1のスタンダードに対するこの発明の認証プロセスのステップを示すフロー図である。

【図7】 測定されたステップ高さの本質的に統計的な平均の性質を示す、スタンダードの概略斜視図である。

【図8】 測定されたステップ高さの本質的に統計的な平均の性質を示す、測定された深さに対する測定機会の頻度のグラフ図である。

【図1】

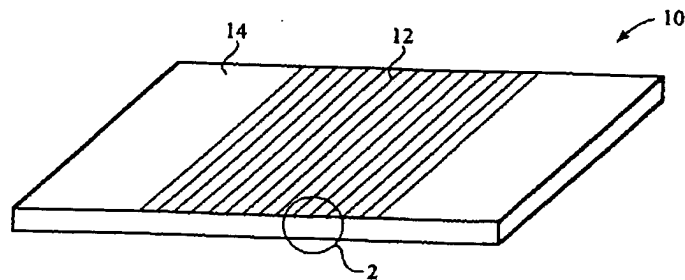


Fig. 1

【図 2】

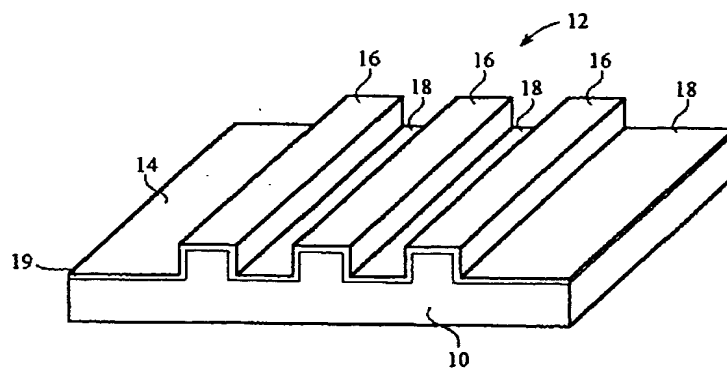


Fig. 2

【図 3】

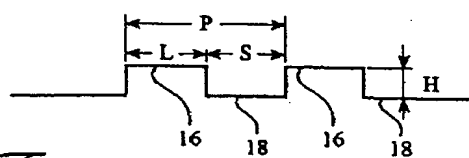


Fig. 3

【図 4 A】

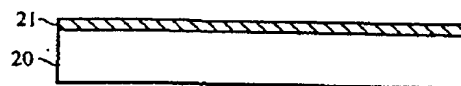


Fig. 4A

【図 4 B】

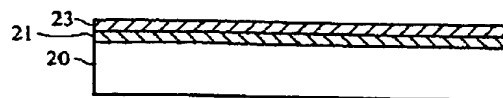


Fig. 4B

【図 4 C】

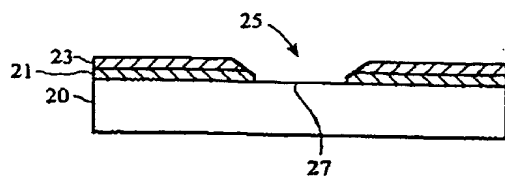


Fig. 4C

【図 4 D】

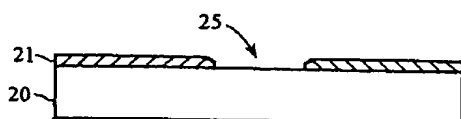


Fig. 4D

【図 4 E】

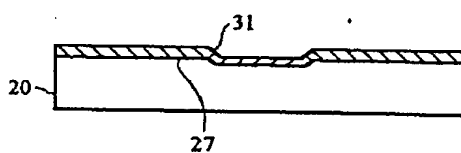


Fig. 4E

【図 4 F】

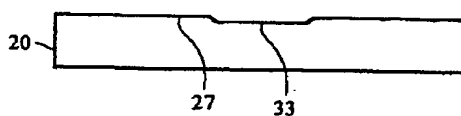


Fig. 4F

【図 5 A】

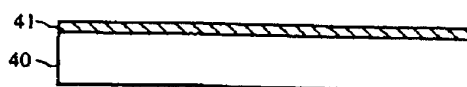


Fig. 5A

【図 5 B】

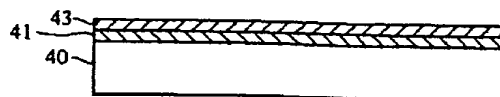


Fig. 5B

【図 5 C】

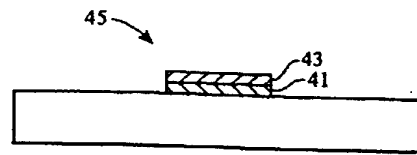


Fig. 5C

【図 5 D】

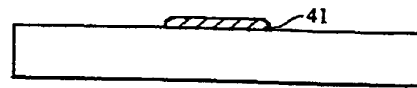


Fig. 5D

【図 5 E】

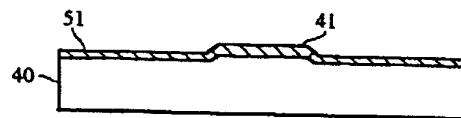


Fig. 5E

【図 5 F】

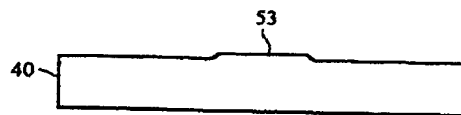
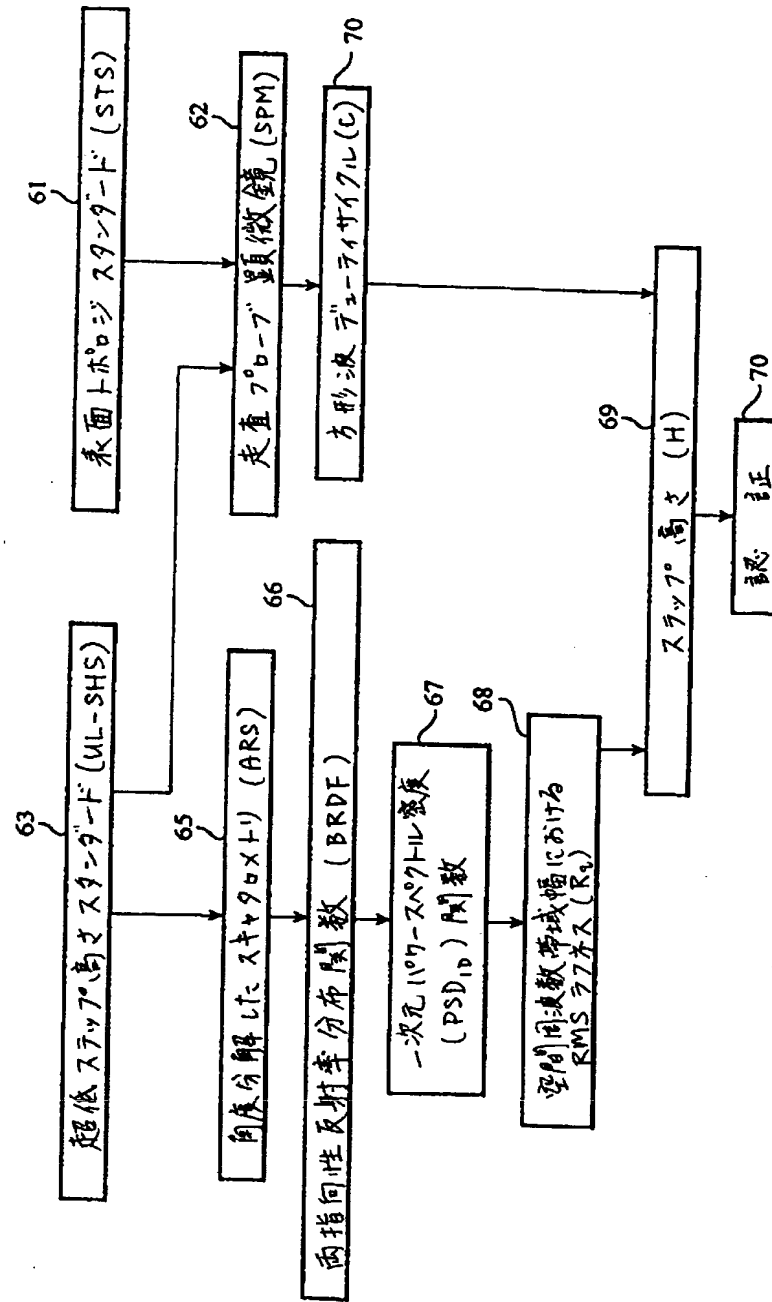


Fig. 5F

【図6】



【図 7】

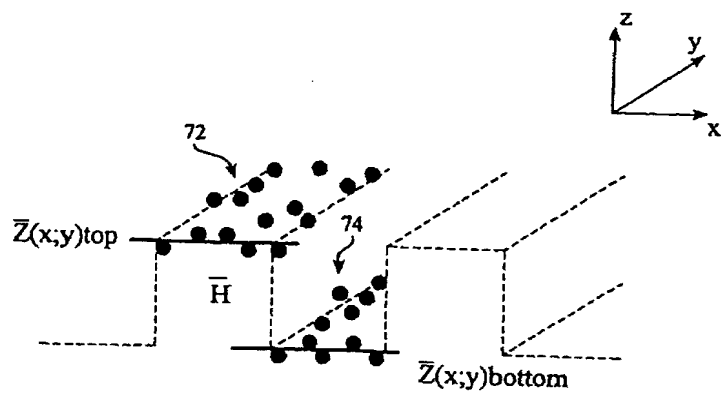
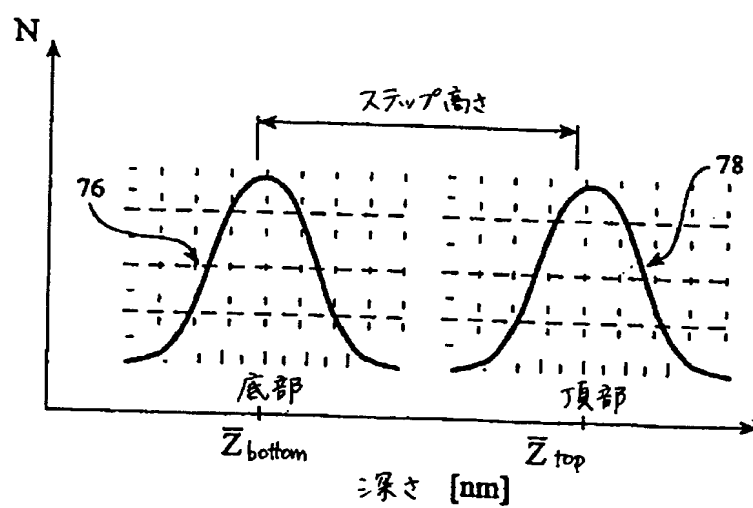


Fig. 7

【図 8】



【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/US99/01189

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER IPC(6) : G01B 11/30 US CL : 73/1.89; 250/252.1; 356/243.4 According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) U.S. : 73/1.89; 250/252.1(both unofficial breakdowns R and A); 356/243.4, 243.3, 243.7. For.106 Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) Please See Extra Sheet		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y — A	TAKACS. P.Z. et al. A Step-Height Standard for Surface Profiler Calibration, SPIE. pub. 1993. Vol. 1995. pages 235-244, especially page 235	1, 6-10 — 2-5
Y	STOVER. J.C. Requirements and suggestions for industrial smooth surface microroughness standards. SPIE. Proceedings. 8-9 August 1996 (08-09.08.96). Vol. 2862. pages 69-77, especially pages 69-70 and page 74, last paragraph	1, 6-10
Y	US 5,599,464 A (LAIRD et al) 04 February 1997 (04.02.97), abstract, col. 5, lines 31-40 and col.5, line 58 - col. 6, line 27	6, 8-10
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "B" earlier document published on or after the international filing date "C" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but aimed to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "Z" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 21 MAY 1999		Date of mailing of the international search report 28 MAY 1999
Name and mailing address of the ISA/US Commissioner of Patents and Trademarks Box PCT Washington, D.C. 20231 Facsimile No. (703) 305-3230		Authorized officer TOM NOLAND <i>(Signature)</i> Telephone No. (703) 303-4765

Form PCT/ISA/210 (second sheet)(July 1992)*

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/US99/05189

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y,E,L	Abstract of WO 99-08524 A (VLSI STANDARDS INC) 18 February 1999 (18.02.99) , i.e. abstract by DERWENT INFORMATION LTD. copyright listed as 1998 but should apparently be 1999. DERWENT-WEEK: 199916. DERWENT-ACC-NO: 1999-180529	1, 6-10

Form PCT/ISA/210 (continuation of second sheet)(July 1992)*

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/US99/05189

B. FIELDS SEARCHED

Electronic data bases consulted (Name of data base and where practicable terms used):

APS: files USPAT, USOCR, EPO, JPO

search terms: certify?, certify?, certification#, test?, check?, verify?, stepheight#, step, height#, roughness?,
microroughness?, calibrat?, reference, standard#

Form PCT/ISA/210 (extra sheet)(July 1992)*

フロントページの続き

(72)発明者 プロチャスカ, ジェイ・ジェリー
アメリカ合衆国、94517 カリフォルニア
州、クレイトン、レイブン・ウェイ、5019

Fターム(参考) 2F065 AA22 AA24 AA50 AA51 BB18
CC19 EE00 FF00 FF41 FF61
GG04 GG22 PP24 QQ14 QQ33
QQ41 QQ42
2F069 AA42 AA43 AA49 AA57 AA61
BB15 CC06 FF07 GG04 GG07
GG11 NN02 NN06 NN25 NN26